

jh160057-NAH

動的負荷分散による GPU スパコンを用いた粒子法の大規模シミュレーション手法の開発 III -Debris Flow の衝撃による建造物の破壊-

都築 怜理 (海洋研究開発機構)

概要 Debris Flow の粒子法解析において、これまで剛体連結で表現していた建造物に対し、QDEM (Quadruple Discrete Element Method) による粘弾性体解析を可能にした。また、点-面、線-線の 2 種類の衝突パターンを考慮した多面体幾何学に基づくポリゴン衝突判定により建造物の表面形状を表現し、表面摩擦の問題、及び幾何的な形状異方性から実現の難しい将棋倒し問題において良好な結果を得た。加えて、空間充填曲線を用いた格子細分化による動的負荷分散法を適用し、TSUBAME2.5 における 512 ノードを用いた弱スケリングで 90%以上の並列化効率を達成した。さらに、SPH 法による流体計算と連成させ、QDEM-SPH による流体-構造連成解析を可能にした。以上により、物体のデータ・リダクションにより並列化効率が著しく悪化する問題を解決するとともに、任意形状の建造物に対する粘弾性体解析、及び表面形状を考慮した接触解析を同時に扱うことのできる実用的な Debris-Flow の粒子法解析が可能になった。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学・学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

都築 怜理 (海洋研究開発機構) 大規模 GPU 計算の実装と TSUBAME2.5 でのシミュレーションの実施、全体の総括

青木 尊之 (東工大) 粒子法の計算コードの開発と動的負荷分散アルゴリズムの検討

西浦 泰介 (海洋研究開発機構) 相互作用計算の最適化、SPH との連成計算、DEM による破壊計算アルゴリズムの検討

森口 周二 (東北大) DEM 計算の斜面災害及び土質力学への適用性の検討

井元 佑介 (東北大) 粒子法による計算手法の改良

2. 研究の目的と意義

Debris Flow は土砂災害の一つであり、津波などと並んで多数の建造物と流体が相互に連成する複雑な流体现象である。これらは我々の社会に甚

大な物的・人的被害を与えるため、発生を予測して被害を未然に防ぐことは、本来、数値シミュレーションに期待される役割のひとつである。しかし、突発的に発生する一次災害を予測することは実際には極めて難しい。

近年、防災研究の分野では、二次災害予測への数値シミュレーションの活用が期待されている。すなわち、一次災害の発生時に得られたデータを初期入力として二次災害の被害状況を予測することや、災害発生の原因を逆推定すること、津波に対する防波堤や土石流に対する堤防の粘り強い施工法の提言などが求められており、土木工学分野を中心に盛んに研究が進められている。

Debris Flow などの流体-構造連成の数値シミュレーションでは、流体や粉体の空間的な局在や時間的に粒子の空間分布の変化に問題なく対応するためにラグランジュ的な時間積分を行う必要があり粒子法が有効な手段である。しかし、粒子位置で流体方程式を解くため 1 個の粒子を計算するために周囲の 100 個近い (SPH 法の場合) 粒子の位置や速度を参照する必要があり、浮動小数点演算量およびメモリアクセス量ともに多い。また、粒子位置がランダムであるため、メモリアクセスの効率も非常に悪い。このため、計算負荷の高い Debris Flows の 3 次元解析を現実的な時間内で実

行するには、計算資源が豊富なスーパーコンピュータの利用が必須になる。しかし、ノード間の動的負荷分散の導入や、各ノードに搭載されたアーキテクチャに適した高効率計算アルゴリズムの開発が必要であり技術的な障壁は高い。数百メートル四方に及ぶ三次元 Debris Flow シミュレーションを粒子法により実現した先行研究例は、本研究課題の昨年の成果が唯一であり、その場合も解析精度の観点から改善の余地を残している。

【今年度の研究目的】 Debris Flow の大規模シミュレーションにおいて、構造物を正しく取り扱い、破壊などの応用段階の力学計算モデルを導入してより現実に近い Debris Flow 解析を実現することを最終目標としている。

Debris Flow の粒子法解析は、(1)流体解析、(2)構造物の力学解析、(3)流体と構造物の連成解析、(4)構造物同士の接触解析、の 4 つの計算過程に大別できる。昨年度までの研究成果によって(1)、(3)に対しては幾らかの課題はあるもののおおむね妥当な手法を導入できている。一方、昨年度は(2)構造物の力学解析には取り組んでおらず、物体を剛体とみなしている。代表的な構造解析手法である有限要素法 (FEM: Finite Element Method) がそうであるように、破壊などの応用段階の力学計算モデルを導入するためには、まずは構造物における弾性体解析の導入が必要である。また、剛体としたことにより、ノード間の通信負荷が増大する問題も発生している。物体への作用力や物体に発生したトルクの総和計算を行うために、ノード間でマスター・ノードを決めてそこに物理量をリダクションさせる必要が生じてしまい、並列化効率が 256 ノードでも 30%程度まで著しく低下するなど大規模化の妨げとなっている。

また、昨年度は(4)構造物同士の接触解析にも取り組んでいない。構造物に対する流体やほかの構造物の侵入を防ぎ、表面形状の違いが計算結果に与える影響を評価できるようにする必要がある。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義
GPU スパコンにおいて動的負荷分散を用いた

高効率な大規模粒子法アプリケーション開発の実績のある研究代表者が、地盤工学及び応用数学の分野で DEM や SPH 法の研究実績を持つ研究者らと共同研究をすることができ、流体や構造の力学計算における計算精度や計算アルゴリズムの知見を取り入れたより高度な大規模粒子計算アプリケーション開発をすることができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

DEM と SPH を使った流体構造連成計算について、動的負荷分散を適用することにより GPU スパコン上で大規模粒子シミュレーションを実行することを可能にした。木構造に基づいて計算領域を細分化し、空間充填曲線により分割領域内の粒子数の均一化を図った。物体は流体粒子と同じサイズの球形粒子を剛体連結することで表現し、同じ手続きで相互作用を計算する。GPU 内の粒子番号のソートにより相互作用計算を高速化し、物体にかかる力とトルクの総和計算の実装を検討した。大規模計算で並列性能が低下するスライス・グリッド法に基づいた動的領域分割に対し、空間充填曲線としてヒルベルト曲線、モートン曲線、ペアノ曲線に基づいた領域分割を検証し、大幅な性能向上を達成した。東京工業大学の TSUBAME2.5 に搭載された 256 個の GPU を使い、総粒子数 1.1 億個、1 万個の複雑形状をした瓦礫 (物体構成粒子数 210 万個) が浮遊する津波シミュレーションを流体・構造連成計算として実行した。その結果、領域境界近傍 (袖領域) の粒子データの通信時間が粒子の相互作用計算より長くなる点、物体数が増えると力とトルクの総和計算を含んだ運動の時間積分が全体の計算時間の 67%を占めるようになるなど課題が判明した。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1. QDEM を用いた粘弾性多体系に対する接触解析の実現

5.1.1 粘弾性体解析手法 QDEM の概要

QDEM (Quadruple Discrete Element Method)

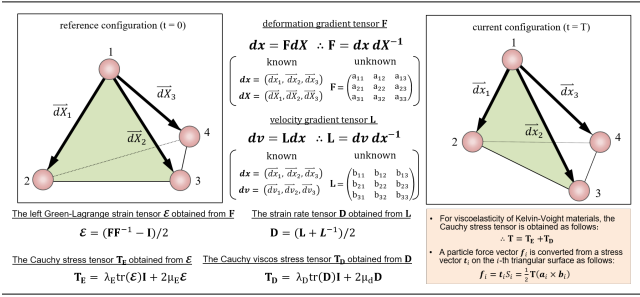


図 1 QDEM の概念図と関係式の一覧

は粘弾性体の変形解析手法の一つであり、隣接する四粒子間で連続体力学から導かれる構成式にしたがって応力テンソルを算出し、それを四粒子に対する力へと変換して与える。応力テンソルの計算が各四面体で完結しているため、分散メモリ環境では四面体要素毎にデータを隣接領域に移動させればよく、高い並列化効率が得られることが期待できる。さらに、連続体力学に準じているため、個別要素法 (DEM: Discrete Element Method) によるバネ連結によって構造物を表現する手法などと異なり、ヤング率やポアソン比などの構造物の材料特性をそのまま利用できる利点がある。

図 1 に示すように、四面体要素の基準形状 (t = 0) と現在の形状 (t=T) を表す 3 つの一次独立なベクトル \mathbf{dX} と \mathbf{dx} を考える。微小変形を仮定するとこれらは線形変換の関係にあるので、9 つの成分を持つ変形勾配テンソル \mathbf{F} を用いて以下の様に表せる。

$$\mathbf{dx} = \mathbf{F}d\mathbf{X} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{dx} と \mathbf{dX} は一次変換であるから、 \mathbf{F} の 9 つの成分を決定するためには、 \mathbf{dx} 、 \mathbf{dX} を構成する 3 組の一次独立なベクトルの変換を調べればよい。すなわち、 \mathbf{F} は \mathbf{dx} に逆行列 \mathbf{dX}^{-1} を右からかけて求めることができる。フック弾性体においては図 1 下部に示すように変形応力テンソル \mathbf{F} と実際の弾性応力テンソル \mathbf{T}_E は一対一に対応するので、弾性応力テンソルについても同様に決定できる。

粘弾性体の場合、式(1)の変形勾配テンソル \mathbf{F} の代わりに速度勾配テンソル \mathbf{L} が定義され、現在の変位 \mathbf{dx} 、及び変位速度 \mathbf{dv} 、及び速度勾配テン

ソル \mathbf{L} の間には以下の関係がある。

$$\mathbf{dv} = \mathbf{L}d\mathbf{x} \quad (2)$$

\mathbf{dv} は現在の形状 (t=T) における四面体の任意の頂点における速度ベクトルを、他の 3 つの頂点における速度ベクトルから差し引いた 3 つの相対速度ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ から構成される行列である。微小変形を仮定すれば \mathbf{dv} と \mathbf{dx} は一次変換であるから、現在の変位 \mathbf{dx} と相対速度ベクトル \mathbf{dv} から速度勾配テンソル \mathbf{L} を求めることができる。ここで、粘性応力テンソル \mathbf{T}_D と速度勾配テンソル \mathbf{L} も一対一に対応に変換できるので、 \mathbf{T}_D についても同様に決定できる。

得られた応力テンソル $\mathbf{T} (= \mathbf{T}_E + \mathbf{T}_D)$ を四面体の四頂点の寄与分に分解し、さらに頂点に加わる力に分解して与え、頂点粒子の質量をもとに運動方程式の時間積分 (ここでは Verlet 法) を用いて頂点座標の位置と速度を更新する。

5.1.2 QDEM の精度検証-片持ち梁(はり)解析

片持ち梁の問題において QDEM を弾性体の解析精度を検証した。梁の一方を固定端とし、もう一方を自由端として配置した後、自由端に荷重を加える。このときの荷重方向の変位 δ は、以下のように解析的に決定できる。

$$\delta = \frac{PL}{3EI} \quad (3)$$

ここで、 P は荷重、 L は梁の長さ、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。

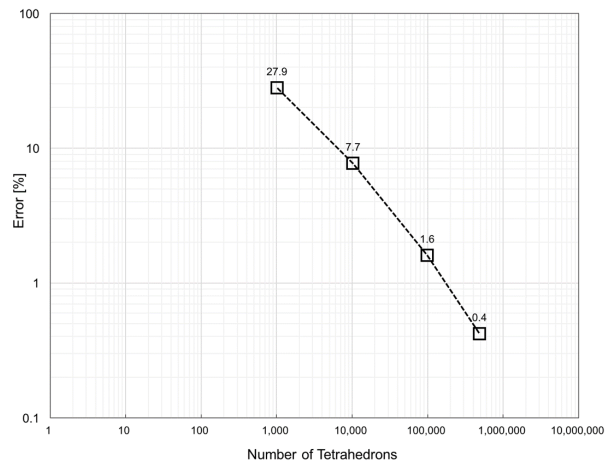


図 2 解析解に対する収束性の要素数依存性

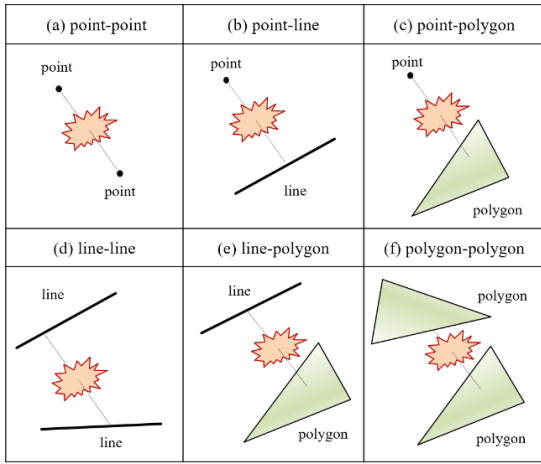


図 3 ポリゴン同士の衝突パターン(全 6 種類)

片持ち梁を構成する四面体要素数を横軸に、式(3)から算出した理論値に対する計算値の誤差を縦軸にプロットした結果を図 2 に示す。四面体要素数が 45 万個の時点で誤差が約 0.4% となった。これは FEM (有限要素法) の一次要素を用いて計算する場合と同様の収束性であり、QDEM の解析精度の妥当性が確認できた。

5.1.3 多面体幾何学に基づく構造体の表面形状の表現

(a) QDEM に適した表面形状の数理モデル

QDEM を用いた粘弾性体解析では、各四面体要素は、四つの節点に配置された粒子の変位と速度に関する情報のみを保持している。従って、構造物の表面形状は定義されておらず、そのままでは互いにすり抜けを起こしてしまう。構造物の接触を正確に表現するためには、各四面体要素において節点を結んで線や三角形(ポリゴン)を形成し、それらの衝突判定をおこない互いに侵入を防ぐことによって表面形状を表現する必要がある。

ポリゴン同士の衝突パターンは図 3 に示すように全部で 6 通り存在する。四面体要素同士の幾何的配置に関係なくいかなる場合もすり抜けが生じないようにするためには、6 通りすべての衝突パ

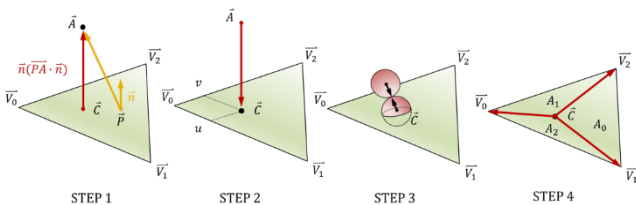


図 4 点-面衝突計算を行う 4 段階のステップ

ターンを計算する必要がある。しかし、ポリゴン同士の衝突判定のアルゴリズムの実装は計算手続きが非常に煩雑であるうえに計算負荷も高い。そのため、すべての衝突パターンを網羅的に計算することは計算効率の観点からも計算コード開発の観点からも非現実的である。

6 通りの衝突パターンのうち、(c)点一面衝突が計算できれば(a)や(b)は実質的に同時に解決される。また、(f)面一面衝突は、(c)点一面衝突や、(d)線一線衝突に分解できる。(e)線一ポリゴン衝突も、同様の考え方から(c)点一面衝突、若しくは(d)線一線衝突に分解できる。そこで、本研究では実用上有効な (c)点一面衝突、及び (d)線一線衝突の 2 種類の衝突計算を導入する。

【点-面衝突の計算】

図 4 に点一面衝突計算の手順に示す。粒子の中心座標を \vec{A} とし、 \vec{A} から見た三角形上の最近点を \vec{C} とすると、これらは以下の関係にある。

$$\vec{C} = \vec{A} - \vec{n}(\vec{PA} \cdot \vec{n}) \tag{4}$$

\vec{P} は三角形上の任意の点であり、 \vec{n} は三角形の法線ベクトルである。このときの幾何的位置関係は STEP1 のように描ける。次に STEP2 において、 \vec{C} に対して三角形の内外判定を行う。ここで、位置ベクトル \vec{C} は式(5)、式(6)のように 2 通りに表現できる。

$$\vec{C} = \vec{V}_0 + u * \vec{V}_0V_1 + v * \vec{V}_0V_2 \tag{5}$$

$$\vec{C} = \vec{A} + t * \vec{AC} \tag{6}$$

t, u, v はスカラー値である。式(5)、式(6)から、 t, u, v を未知とする三次元連立方程式(7)を以下のように得る。

$$u * \vec{V}_0V_1 + v * \vec{V}_0V_2 - t * \vec{AC} = \vec{A} - \vec{V}_0 \tag{7}$$

式(7)を満たす (t, u, v) は一般的によく知られたクラメルの法則を用いて求めることができる。ここで、解の組 (u, v) が $u \geq 0 \wedge v \geq 0 \wedge u + v \leq 1$ を満たすとき、位置ベクトル \vec{C} は、三角形の内部にあると判定できる。その場合、STEP3 に示

すように、位置ベクトル \vec{C} と位置ベクトル \vec{A} に粒子を仮想的に配置し、それらの二つの粒子間で DEM (個別要素法) による衝突判定と接触力の計算を行う。

最後に、STEP4 に示すように求められた接触力 \vec{F} を三角形の各頂点に分配する。簡単のため、各頂点に分配される力 $\vec{F}_0, \vec{F}_1, \vec{F}_2$ のそれぞれについて三角形を接触点で面積要素に分割した際の面積比に応じて式(8)のように分配している。

$$\vec{F}_0 = \frac{A_0}{A} \vec{F}, \vec{F}_1 = \frac{A_1}{A} \vec{F}, \vec{F}_2 = \frac{A_2}{A} \vec{F} \quad (8)$$

ここで、 A_0, A_1, A_2 はそれぞれ、 $\overline{CV_1V_2}, \overline{CV_2V_0}, \overline{CV_0V_1}, \overline{V_0V_1V_2}$ の面積を表している。

【線-線衝突の計算】

互いにねじれの位置にある 2 直線の幾何学的関係は図 5 のようになっており、そこから d_1, d_2 についての二元連立方程式を導くことができる。点-面衝突の場合と同様に 2 直線の最近接点の座標に仮想粒子を配置して DEM による衝突判定と接触力の計算を行い、線分比に応じた力の分配を行う。

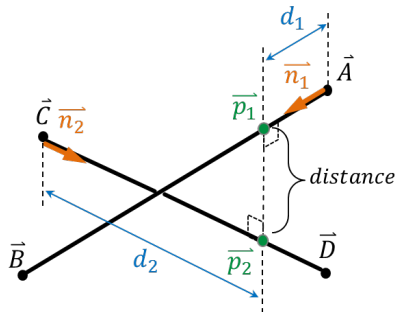


図 5 ねじれの位置にある二直線

(b) マルチスレッド計算のための効率的な実装

QDEM は各四面体要素 (=隣接四粒子) が保持する座標と速度のみを用いて変形解析を行うため局所性に優れており、その特性を生かした並列計算手法を図 6 を用いて説明する。通常の粒子法計算では解析粒子の番号を近傍探索リストに登録するが、QDEM による多体接触計算では四面体要素の番号を近傍探索リストに登録する。図 6 の下段に示すように、QDEM による多体接触計算では各構造物の表面部分にある四面体要素のみを必要とする。そこで、図 6 の上段の左側に示すように計算開始前にあらかじめ計算領域内のすべての四面体

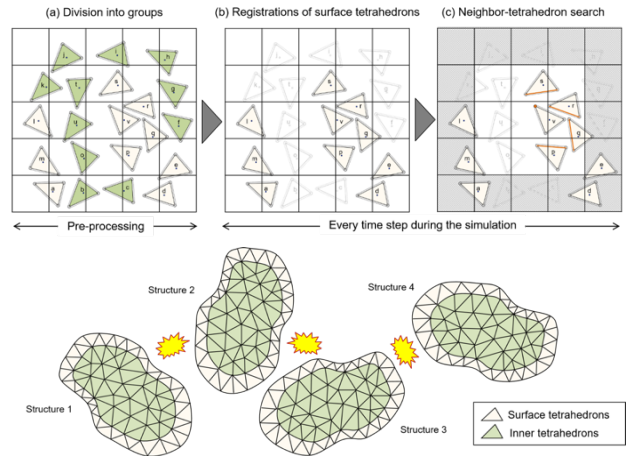


図 6 近傍領域にある四面体要素の探索手順(上部)、及び構造物同士の接触の様子を表した概念図(下部)

要素を表面要素(白)と内側要素(緑)に分類しておく。計算開始以降は、図 6 上段中央部に示すように表面粒子(白)のみを近傍探索リストに登録する。近傍探索リストのセルの幅 L_{cell} を式(9)に示すように計算領域内のどの四面体要素も収まるよう設定すれば、隣接セルに登録された四面体要素とのみ衝突判定を行うだけで済む。

$$L_{cell} \geq \max_{i=0,1,2,\dots,N_{tet}} \{D_{max}^i\} + D_{DEM}, \quad (9)$$

ここで、 D_{DEM} は各頂点に配置する粒子の粒子直径である。また、 D_{max}^i は以下の式で決定される。

$$D_{max}^i = 2.0 * \max(d_1^i, d_2^i, d_3^i, d_4^i) \quad (10)$$

ここで、 d_j^i は i 番目の四面体における重心と各頂点との距離である ($j=1,2,3,4$)。

なお、近傍探索リストに消費されるメモリ容量を削減するため各セルに登録された四面体要素が互いに参照する Linked-list 法を併用している。

一つあたり 6,144 個の四面体要素(内、2,028 個が表面要素)と 1241 個の頂点粒子(内、386 個が表面粒子)から構成される立方体を、縦、横、高さの各方向に 3 つずつ、全部で 27 個を積み上げて配置し、それに対して静解析を行った場合の計算時間の内訳を図 7 に示す。TSUBAME2.5 のノードに搭載された CPU (Intel CPU Xeon X5670 の 2 socket) を使用し、OpenMP により 1 スレッド/1 core として 12 スレッドを用いて計算している。

(A)、(B)は、近傍探索リストに対し、(A)すべての四面体要素を登録した場合、(B)表面を担う四面

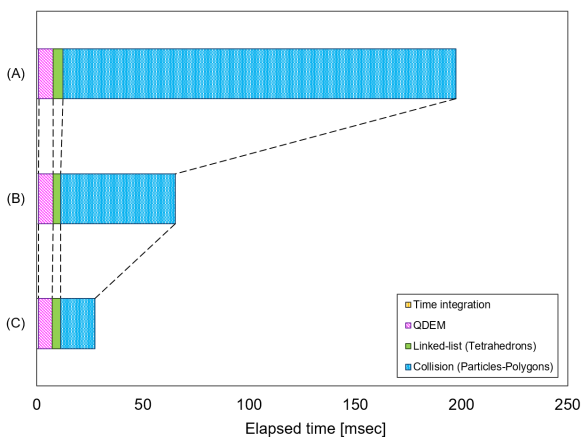


図 7 検証計算における計算時間の内訳

体要素のみを登録した場合のそれぞれの計算時間を表している。近傍探索リストに登録された四面体要素の総量を減らすことによりポリゴンの衝突計算にかかる計算時間を大幅に短縮できている。一方(C)は、(B)においてあらかじめ表面粒子にも識別のためのフラグを設定しておき、衝突計算時に表面を担う四面体要素を構成する 4 枚のすべてのポリゴンと衝突判定を行うのではなく、表面を担うポリゴンとのみ衝突判定を行うように実装した場合の計算時間を示しており、(B)に比べてさらに計算時間が短縮されていることがわかる。

5.1.4 表面形状と摩擦の検証

144 個の四面体要素から構成される 0.05m 四方の大きさの立方体を用意し、図 8 上部に示すように 4.0m の土台 (21,056 個の四面体要素から構成される) の表面上を 3.0m/s の初速を与えて滑らせる検証シミュレーションを行った。進行方向に 0.35m 進むまでの立方体の重心座標の変位を図 8 下部に示している。暫くは弾性振動が見られるが徐々に変位の振動が収まっていく様子が分かる。

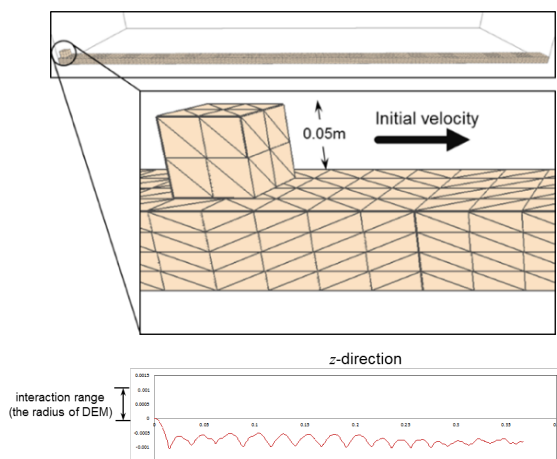


図 8 表面形状と摩擦の検証

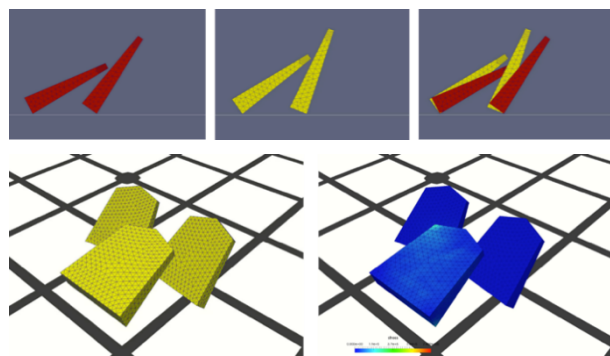


図 9 将棋駒を用いた検証計算

また、定常状態における変位が粒子径よりも大きく振動しないことも確認できる。

5.1.5 幾何的形狀異方性のある問題での検証

幾何的形狀異方性のある将棋駒を用いた衝突シミュレーションを実施した。一つあたり 2,566 個の四面体要素からなる将棋駒を平行に 2 つ並べ、片方を傾けた状態で配置した後、重力により倒伏させてもう一方の駒に衝突させる。将棋駒の先端部分には、ある四面体要素に含まれる 1 個の頂点粒子が配置されており、点-面接触の検証例題に適している。図 9 の上段は、表面摩擦係数を $\mu = 0.1$ (赤)、 $\mu = 0.5$ (黄色)とした場合の倒伏途中のスナップショットを示しており、表面摩擦が大きい場合に将棋駒の倒伏速度が遅くなる妥当な結果が得られたことを示している。

図 9 の下段は、一つの将棋駒を平行に並べた 2 つの将棋駒に衝突させた場合のスナップショットを示している。手前の将棋駒における先端部分の両脇を構成する四面体要素の線と、奥の 2 つの将棋駒における側面部分を構成する四面体要素の線

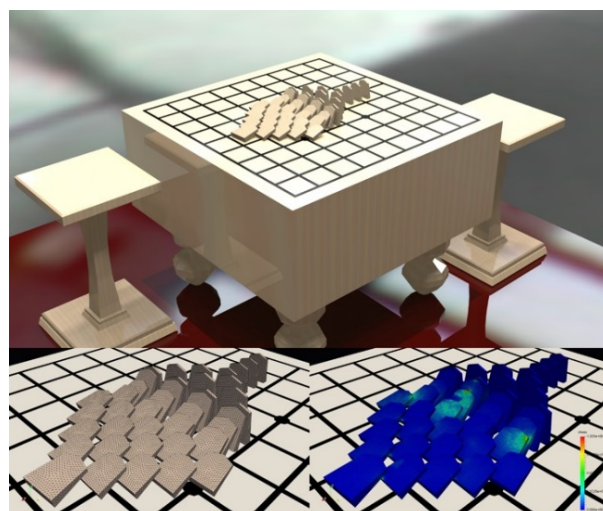


図 10 表面形状を考慮した 40 個の駒を用いた将棋倒しシミュレーション

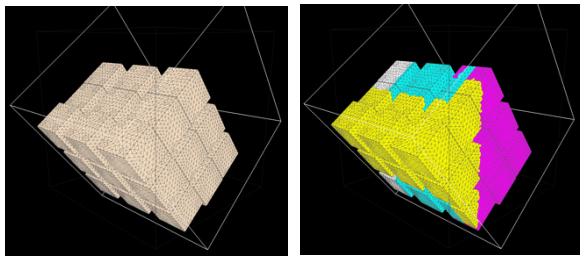


図 11 空間充填曲線による動的領域分割の様子がねじれて交差する線-線衝突が支配的な問題である。シミュレーション結果からは将棋駒の滑らかな偏心衝突の様子が確認できる。

図 10 は、40 個のすべての将棋駒を用いた将棋倒しシミュレーションの結果を示しており、図 9 の場合と同様、表面摩擦の違いにより駒の倒伏速度が異なることが確認できた。

5.2. 大規模並列化への対応と TSUBAME2.5 におけるスケーラビリティ

これまでに開発した大規模(DEM/SPH)シミュレーションに対する空間充填曲線を用いた格子細分化に基づく動的負荷分散コードと、今回新たに開発した QDEM による粘弾性体の多体接触解析コードを合体させ、節点数(=粒子数)を均一化して動的領域分割を行う大規模並列計算コードを開発した。分割手続きに必要な処理は通常の粒子法計算とほとんど変わらないが、各分割領域の領域境界から式(9)で示したセル幅だけ内側の領域に存在する①四面体要素の属性データ(粒子の接続情報と応力値)、②粒子の属性データの 2 種類のデータを隣接する分割領域にコピーする必要がある。

図 11 の右側は、27 個の立方体を含んだ静解析の検証問題に対し、ノード間のデータ交換に MPI 通信を行い、ノード内では OpenMP によりスレッド並列計算を行う MPI + OpenMP のハイブリッド実装を用い、ヒルベルト空間充填曲線による 4 プロセス間の動的領域分割を行う様子を示している。

図 11 と同一の計算条件のもと、水平方向に計算領域を拡大し、それに比例させて立方体の個数を増加させて測定した弱スケーリングの結果を図 12 に示す。ここで、理想的な性能を知るために時間刻みは立方体の移動が無視できる程度に小さく与えている。8 プロセスから外挿した実行性能の理想値と比較して、512 プロセスを用いた段階で

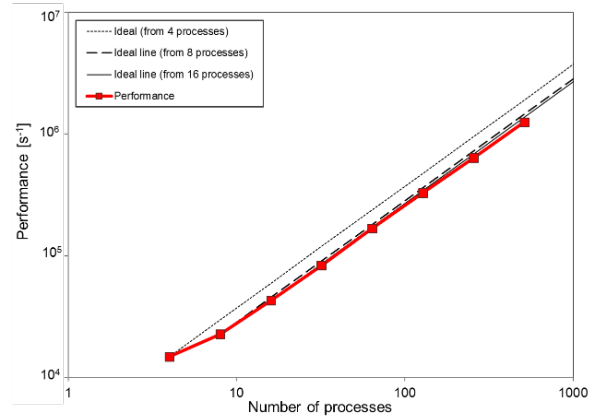


図 12 TSUBAME2.5 における弱スケーリング

90% 以上の並列化効率を達成している。立方体の総数は 3,456 個であり、多数の構造物を含む場合にも高い並列化効率を達成できた。

5.3. 粒子法(SPH 法)による流体計算と多体系の構造物の接触解析との連成

QDEM による表面形状を考慮した粘弾性体の多体接触解析コードを、SPH 法による流体計算コードに適合させ、QDEM-SPH の流体-構造物連成計算コードを開発した。例題として約 5 万個の粒子によるダムブレイク問題を取り上げ、1 プロセスあたり 12 core を割り当て OpenMP により 1 スレッド/1 core として 12 スレッド×4 プロセスで計算した結果を図 13 に示す。なお、式(9)のセル幅内よりも、SPH 法計算における影響半径(カーネル半径)を小さく設定することにより大規模計算でも弱スケーリングを保つことができる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

はじめに、申請書に記載した内容と変更を余儀なくされた部分や、達成できなかった部分を以下に述べる。申請書では離散的な構造物の解析に DDA 法や FEM の導入を予定していたが、DEM や SPH 法との親和性を考慮し QDEM を導入した。その結果、SPH 法による流体計算との連成が容易になっただけでなく、QDEM 特有のアルゴリズムの局所性の良さから分散メモリ環境における高い並列化効率を維持できるようになり、物体のデータ・リダクションによる並列化効率が著しく低下する問題も解消できた。以上により、QDEM の導入は成功だったと判断できる。一方、申請書では(2)構造物の力学解析をさらに発展させて構

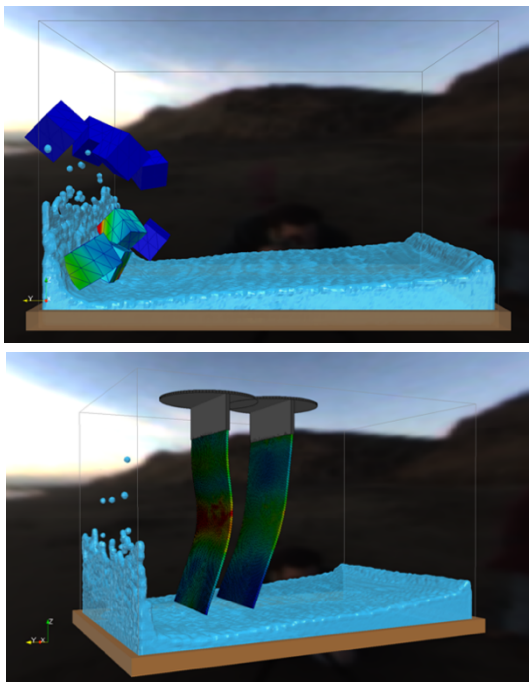


図 13 QDEM-SPH による流体構造連成計算

造物の破壊現象の取り扱いを予定していたが、これは実現には至らなかった。計算コードの GPU 化について、第 5 章で説明したような MPI/Open MP のハイブリット実装だけでなく、Open ACC の指示文へと書き換えた MPI + OpenACC ハイブリット実装を作成して動作確認も行っている。残念ながら、GPU 計算においては予想よりも十分な実行性能が得られず、計算効率や計算コストを議論するまでに至らなかった。高効率に実行できる GPU 化を行うには統合開発環境 CUDA によるコード開発が必要である。

本研究では Debris Flow の粒子法解析において個々の構造物に対して QDEM を用いた粘弾性体解析を導入し、構造物間で多面体幾何学に基づくポリゴン同士の衝突判定により構造物の表面形状を考慮した多体接触解析を可能にしている。SPH 法との連成計算も実現され、さらに、空間充填曲線を用いた格子細分化に基づく動的負荷分散法を適用して TSUBAME2.5 上で弱スケーリングを達成している。序論の「本研究の目的」で述べた Debris Flow の粒子法解析における 4 つの計算過程のうち、昨年度は取り組まれていなかった(2)構造物の力学解析、(4)構造物同士の接触解析を導入できており、全体としては幾らかの余地はあるも

のの及第点であると判断できる。本研究により、任意形状の多数の構造物に対する粘弾性体解析、及び表面形状を考慮した接触解析を同時に扱うことのできる実用的な Debris-Flow の粒子法解析が可能になったと言える。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

(2) 国際会議プロシーディングス

- [2-1] S. Tsuzuki, T. Aoki, “Effective Dynamic Load Balance using Space-Filling Curves for Large-scale SPH Simulations on GPU-rich Supercomputers”, Proceedings of the 6th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems. ACM, New York, NY, USA, 2016. (採択率 55%)
- [2-2] S. Tsuzuki, D. Nishiura, H. Sakaguchi, “Large-scale Simulations of Viscoelastic Deformable Multi-body Systems Using Quadruple Discrete Element Method on Supercomputers”, VII International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, the island of Rhodes, Greece, June, 2017 (Non-reviewed)

(3) 国際会議発表

- [3-1] S. Tsuzuki, T. Aoki, “Large-scale Particle-based Simulations for Debris Flows using Dynamic Domain Decomposition with Space Filling Curves on A GPU Supercomputer”, 11th International SPHERIC (SPHERIC 2016) Workshop at Technische Universität München (TUM), 999, München, Germany, June, 2016
- [3-2] S. Tsuzuki, T. Aoki, “Large-scale Particle Simulations for Debris Flows using Dynamic Load Balance with Space Filling Curves on A GPU-rich Supercomputer”, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS2016), E5457, Crete Island, Greece, June, 2016
- [3-3] S. Tsuzuki, T. Aoki, “Large-scale Particle-based Simulations using Dynamic load balance with Space Filling Curves on a GPU Supercomputer”, International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, 1845356, Kobe, Japan, May, 2016

(4) 国内会議発表

- [4-1] 都築怜理, 青木尊之, “GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた粒子法による大規模土石流シミュレーション,” 日本計算工学会・第 21 回計算工学講演会, 新潟, 6 月, 2016
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- [5-1] 日刊工業新聞「拓く研究者」2017 年 1 月 11 日付新聞(電子・紙媒体)に掲載された。